

Tero Hakala

Taajuusmuuttajien koeajopenkki

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Automaatiotekniikka

Insinöörityö

31.3.2015

Tekijä Otsikko	Tero Hakala Taajuusmuuttajien koeajopenkki
Sivumäärä Aika	31 sivua + 1 liite 31.3.2015
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Automaatiotekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Automaation ohjelmistotekniikka
Ohjaaja(t)	Teknisen tuen päällikkö Ville Karlsson Opettaja Kai Virta
<p>Tämän insinöörityön tavoitteena oli suunnitella Parker Hannifin Oy:lle taajuusmuuttajien koeajopenkki. Koeajopenkin tarkoitus on auttaa yrityksen myyntiä, jotta taajuusmuuttajia voidaan tarjota asiakkaille muiden tuotteiden ohella.</p> <p>Työssä perehdyttiin myös taajuusmuuttajien ja sähkömoottoreiden toimintaan ja rakentamiseen. Työn suunnitteluvaiheessa tutustuttiin Autodesk Inventor - ohjelman käyttöön.</p>	
Avainsanat	taajuusmuuttaja, sähkömoottori

Author(s) Title	Tero Hakala Frequency Drives test bench
Number of Pages Date	31 pages + 1 appendice 31 March 2015
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Automation Engineering
Specialisation option	Automation Software
Instructor(s)	Ville Karlsson, Tech Support Manager Kai Virta, Lecturer
<p>The aim of this final year project was to design a frequency drives test bench. The main purpose of this project is to help salesmen to introduce Parker frequency drives for customers.</p> <p>This study also investigated frequency drive operations and electric motors. The use of Autodesk Inventor designing program was also studied in this project.</p>	
Keywords	frequency drive, electric motor

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Taajuusmuuttaja	1
2.1	Taajuusmuuttajan toimintaperiaate	2
2.2	IGBT	10
2.3	Taajuusmuuttajan mitoitus	11
2.4	Taajuusmuuttajan edut ja ongelmat	13
2.5	Penkissä käytettävät taajuusmuuttajat	14
2.6	Peruskytkennät ja käyttöönotto	15
3	Sähkömoottorit	17
3.1	Oikosulkumoottorien käynnistystavat	19
3.2	Penkissä käytettävä sähkömoottori	20
3.3	Sähkömoottoreiden kiristyvät tehokkuusluokat	21
3.4	Nelikvadranttikäyttö	24
4	Koeajopenkki	26
4.1	Penkin toimintaperiaate	26
4.2	Sähkömoottorin ohjaus taajuusmuuttajalla	27
4.3	Penkissä tehtävät harjoitukset	28
	Lähteet	30

Liitteet

Liite 1. Suunnittelun 3D-mallinnukset

Lyhenteet

AC	Vaihtojännite
DC	Tasajännite
Arms	Virran neliöllinen keskiarvo
Hz	Hetrzi, taajuuden yksikkö
I	virta
U	jännite
S	näennäisteho
VA	watti, tehon yksikkö
IE	sähkömoottorien kansainvälinen tehokkuusluokka
ΔT	lämpötilan muutos
PWM	pulssinleveysmodulointi
RPM	kierrosta minuutissa

.

1 Johdanto

Tässä työssä suunnitellaan taajuusmuuttajien koeajopenkki. Työn lähtökohtana on yrityksen tarve saada myyjien ja yhteistyökumppanien käyttöön väline, jolla Parkerin taajuusmuuttajia voidaan esitellä asiakkaille muiden tuotteiden ohessa. Koeajopenkkiin tulee kaksi Parkerin taajuusmuuttajaa, joilla voi ohjata sähkömoottoria.

Parker Hannifin on maailman suurin liikkeenhallinta-alan yritys. Parkerin liikevaihto vuonna 2014 oli 13 miljardia dollaria ja työntekijöitä maailmanlaajuisesti 58 000. Parker suunnittelee ja valmistaa tuotteita seuraaviin teknologiaryhmiin: hydraulikka, automaatio, liitintekniikka, instrumentointi, suodatustekniikka, tiivisteet ja lentokonetekniikka.

Työssä käsitellään oikosulkumoottorin ja taajuusmuuttajan toimintaperiaatetta ja sen erilaisia käyttötapoja.

2 Taajuusmuuttaja

Sähkömoottorikäyttöjä käytetään yleisesti teollisuudessa. Moottorit käyttävät yli 65 % teollisuudessa käytetystä sähköenergiasta. Oikosulkumoottori on suosituin, koska se on huoltovapaa ja edullinen vaihtoehto. Sitä voidaan myös käyttää vaikeissa olosuhteissa, joissa on pölyä ja kosteutta. Oikosulkumoottori on ratkaisu myös räjähdysvaarallisiin tiloihin. Oikosulkumoottoria voidaan kuormittaa suurilla pyörimisnopeuksilla ilman suuria käyttökustannuksia.

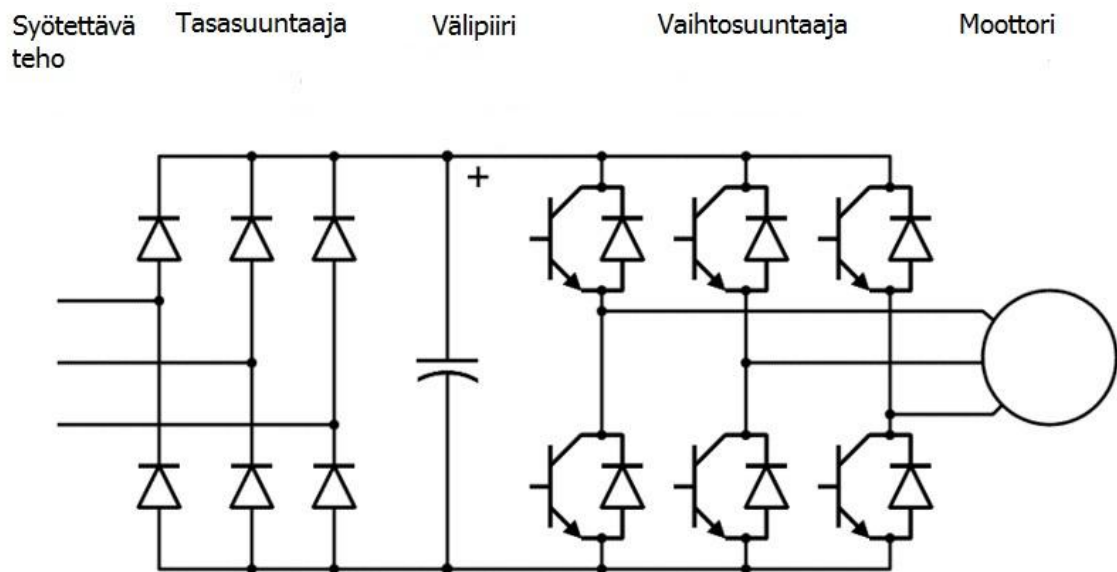
Erilaiset sovellukset vaativat parempia pyörimisnopeuden säätöjä ja erilaista käyttäytymistä suorassa verkkokäynnistyksessä. Suurempien moottorien käynnistyksessä tämä saattaa aiheuttaa häiriötä verkkoon esimerkiksi hetkellisen alijännitteen. Tästä saattaa seurata muita ongelmia prosessiin.

Verkkokäynnistyksessä moottorin käynnistysmomentti on n. 2,5-kertainen verrattuna moottorin nimellismomenttiin, josta seurauksena olevat mekaaniset rasitukset kohdistuvat vaihteistoon ja kuormaan. Tästä johtuen kulumisen nopeutuu, joka lyhentää laitteiden käyttöikää.

Taajuusmuuttaja on tehokas ratkaisu näihin ongelmiin. Taajuusmuuttaja on laite, joka säätelee portaattomasti moottorin pyörimisnopeutta ja vääntömomenttia. Taajuusmuuttajan avulla voidaan siis parantaa prosessin säätöä, pienentää käynnistysvirtaa, säästää energiaa, vähentää merkittävästi mekaanista rasitusta ja parantaa lopputuotetta. Suurimmillaan taajuusmuuttajilla voidaan vähentää moottorin energian kulutusta lähes 50 %.

2.1 Taajuusmuuttajan toimintaperiaate

Taajuusmuuttajat jaetaan kahteen luokkaan: välipiirillisiin ja suoriin. Taajuusmuuttaja sisältää tasasuuntaajan, välipiirin, vaihtosuuntaajan, ohjauselektronikan ja suotimet. Tasasuuntaaja muuttaa verkosta tulevan kolmivaiheisen vaihtojännitteen sykkiväksi tasajännitteeksi. Välipiirilliset taajuusmuuttajat voidaan jakaa välipiirissä käytetyn toteutustavan perusteella jänniteohjattuihin ja virtaohjattuihin. Alla olevassa kuvassa on esitettyä taajuusmuuttajan periaatekaavio.

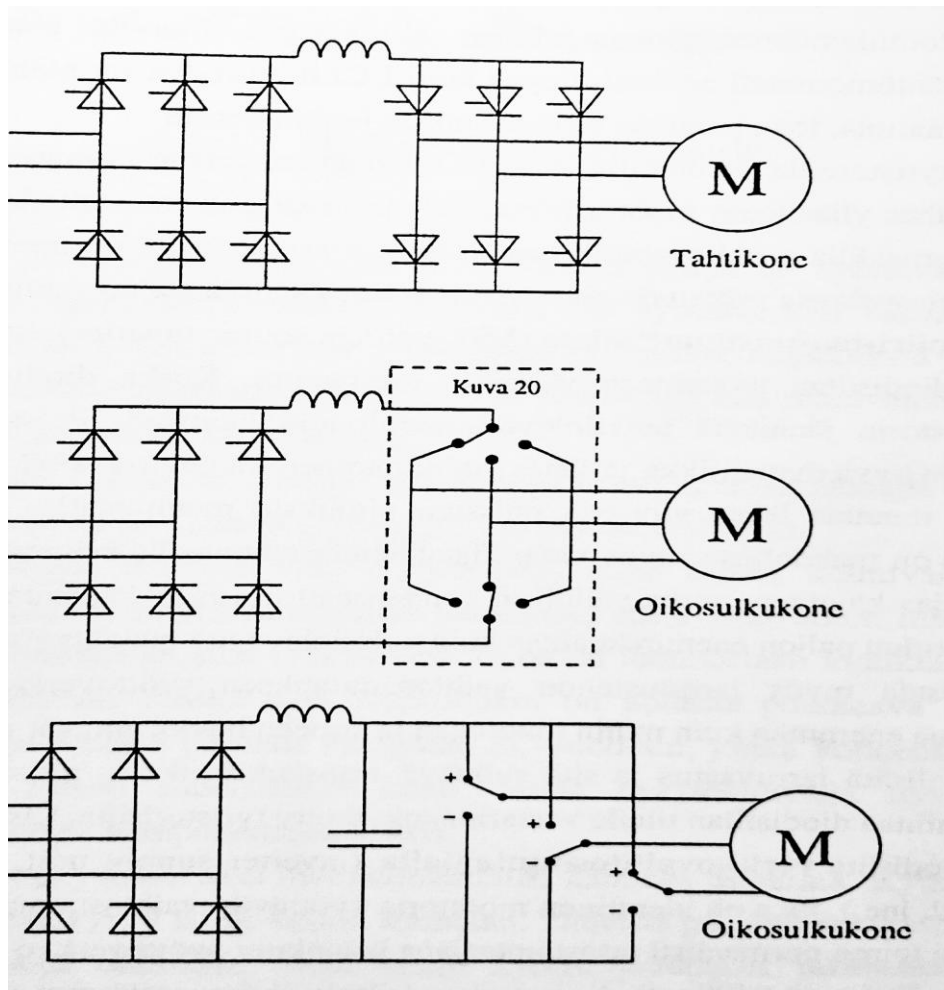


Kuva 1. Taajuusmuuttajan periaatekaavio. [2]

Välipiirejä on olemassa kolmea tyyppiä. Yhdessä ratkaisussa muunnetaan tasasuuntaajan jännite tasavirraksi. Tätä kutsutaan kuormakommutoiduksi taajuusmuuttajaksi,

englanniksi Load Commutated Inverter (LCI). Se sisältää kaksi tyristorisiltaa, joista ensimmäinen on kytketty verkkoon ja toinen tahtikoneeseen. Tyristorisiltojen välillä on välipiiri, joka sisältää kuristimen. Verkkoon yhdistetty tyristorisilta toimii tasasuuntaajana ja tahtikoneen puoleinen vaihtosuuntaajana. Pienillä nopeuksilla toimittaessa tyristorit kommutoivat huonommin, koska tahtikoneen jännite alenee lähelle nollaa. Alhaisilla nopeuksilla verkonpuoleisella tyristorisillalla ohjataan välipiirin virta nolnaan jokaisella kerralla, kun seuraava koneen puolella oleva tyristori pitää sytyttää ja johtavassa tilassa oleva tyristori sammuttaa. Kuormakommutoidun taajuusmuuttajan vääntömomentista tulee tämän takia epätasaista ja tästä johtuen tämä ratkaisu ei ole paras mahdollinen sovelluksiin, joissa vaaditaan isoa vääntömomenttia pienillä nopeuksilla.

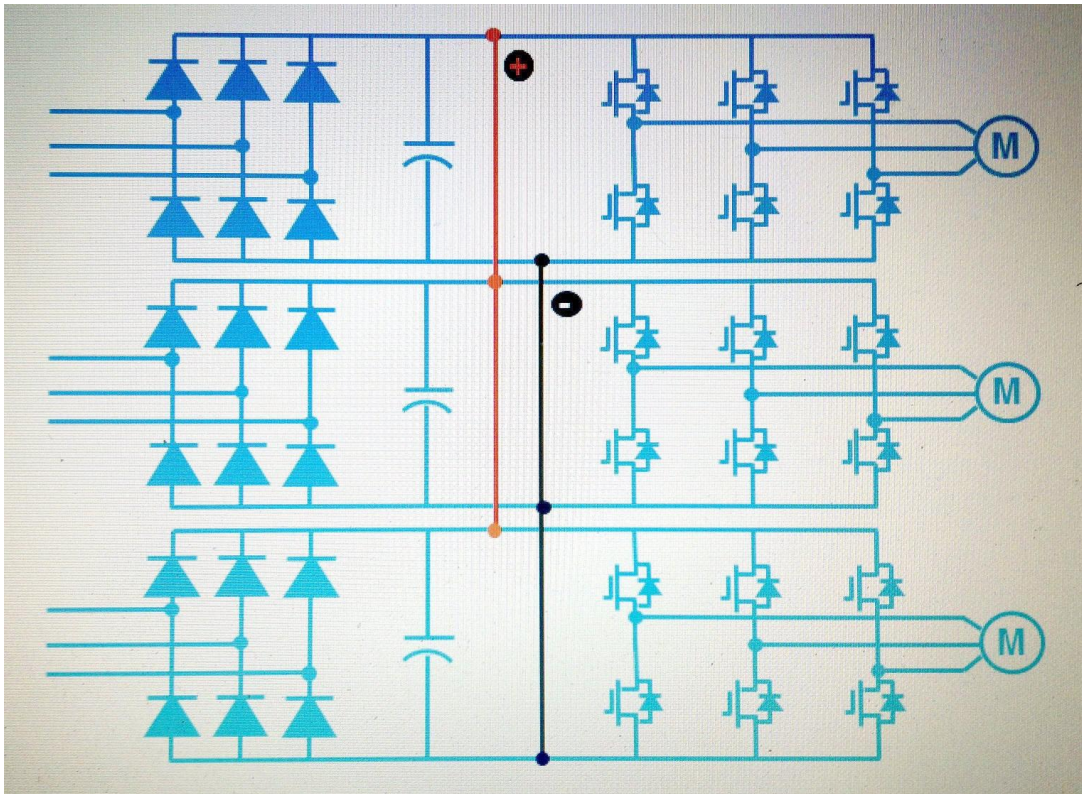
Toisessa ratkaisussa korvataan tahtikoneen puolella oleva tyristorisilta kommutointikondensaattoreilla, joka mahdollistaa alhaisilla nopeuksillakin katkottoman ajon. Tätä kutsutaan virtavälipiiriksi, josta englanniksi käytetään lyhennettä CSI (Current Source Inverter). Tämä ratkaisu tuottaa myös tasaisemman vääntömomentin kuin ensimmäisessä ratkaisussa. Virtavälipiirin voi toteuttaa myös tyristoreilla, joiden täytyy olla GTO-tyrstoreita. Nämä tyristorit ovat hilalta sammutettavia. Etuina tässä ovat lähes sinimuotoinen moottorijännite ja yliaalloton moottorivirta. Sähkön yliaaltosäröä syntyy sähkölaitoksissa ja se on yksi sähkösaasteen muodoista. Alla olevassa kuvassa on muodostettu yliaaltosuodattimilla loistehonkompensointi. Yliaallon ilmenemismuotoja ovat sähkölaitteiden ylikuumeneminen ja häiriöt mittalaitteissa. [6, s. 6 - 8]



Kuva 3. Tässä esiteltynä kuormakommutoitu taajuusmuuttaja, virtavälipiiri-taajuusmuuttaja ja jännite välipiiritajuusmuuttaja 8 [6, s. 49]

Edellä mainittujen välipiirien lisäksi on olemassa vaihtoehto, jossa välipiirit ovat yhdistetty keskenään (Common DC Bus). Sen edut ovat suunnittelun joustavuus, tehokkuuden lisääntyminen ja kulujen säästö. Yhdistetyssä välipiirissä energiaa voidaan uudelleen käyttää, kun moottorin jarrutusenergia palautuu verkkoon päin. [14, s. 2]

Yhdistetyssä välipiirissä tarvitaan vähemmän komponentteja kuin muissa ratkaisuissa. Tällä tavalla syntyy merkittäviä kustannussäästöjä, koska järjestelmä vaatii vähemmän asennustyötä, komponenttien vaihtoa ja varaosien hankkimista. [14, s. 2]



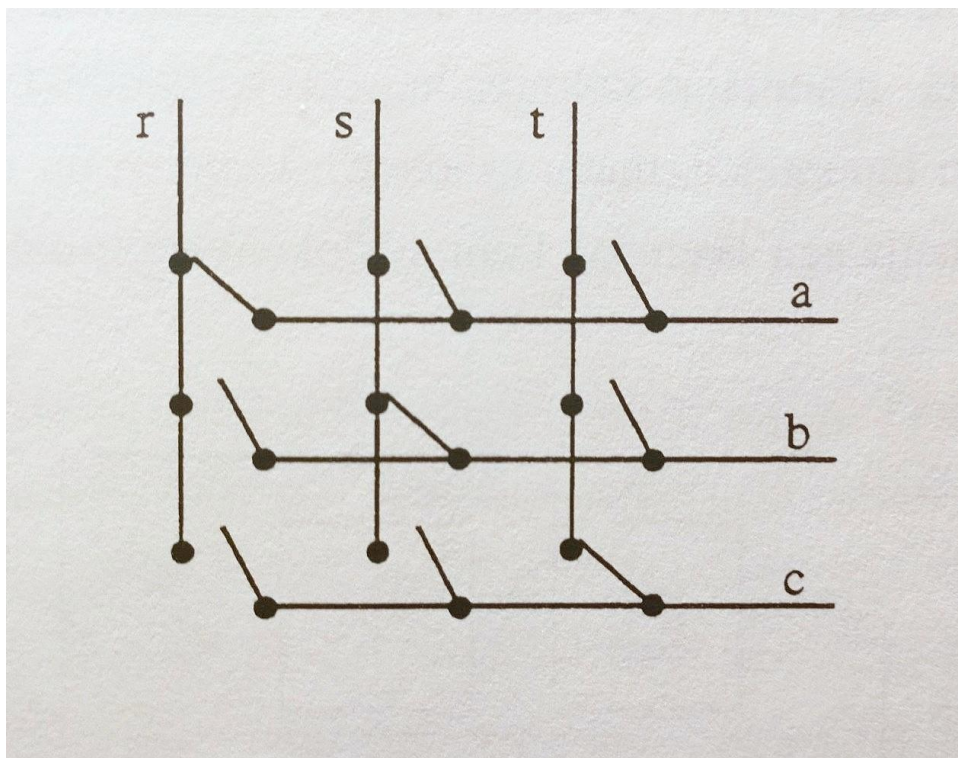
Kuva 4. Taajuusmuuttajan yhdistetty välipiiri.

Vaihtosuuntaajassa sähköistä signaalia muokataan viimeisen kerran ennen kuin se siirtyy taajuusmuuttajasta eteenpäin. Välipiiristä tulee vaihtosuuntaajalle muuttuvaa tasavirtaa, tasajännitettä tai vakiotasajännitettä. Vaihtosuuntaajalta moottorille syötettävän virran täytyy olla aina vaihtovirtaa. Taajuus muuttuu vaihtosuuntaajassa, jos se saa muuttuvan virran tai jännitteen. Toisessa tilanteessa jännitteen ollessa vakiotasajännite, vaihtosuuntaaja muuttaa jännitteen taajuutta ja amplitudia. Vaihtosuuntaaja eli invertteri ohjaa moottorijännitteen taajuutta. Ohjauspiirit lähettävät viestejä tasasuuntaajaan, välipiiriin ja vaihtosuuntaajaan. Ohjauspiirit lähettävät vaihtosuuntaajaan viestin, joka ohjaa ne johtamis- tai katkaisutilaan.

Taajuusmuuttajaa käyttämällä ei välttämättä tarvita kontaktoria ja lämpörelettä. Moottori käynnistyy ja pysähtyy taajuusmuuttajan ohjauspiirin releeseen vaikuttavalla käynnistyssignaalilla.

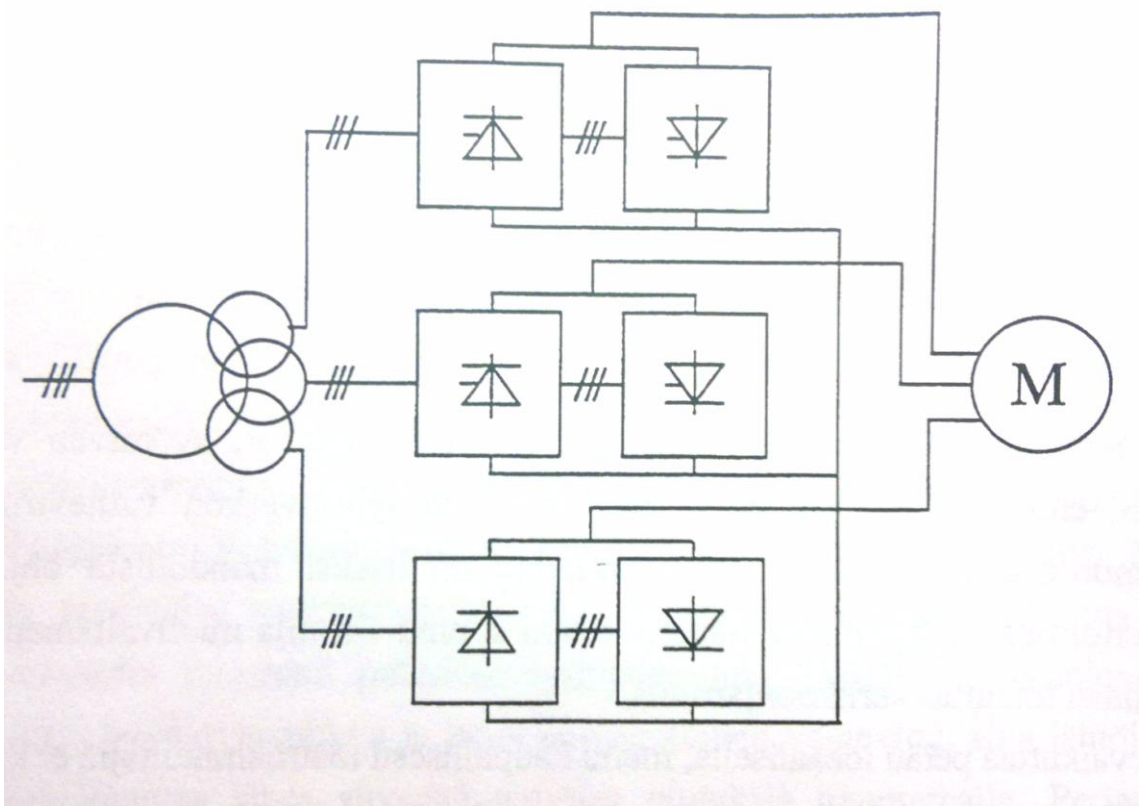
Suorissa taajuusmuuttajissa ei ole välipiiriä. Suorat taajuusmuuttajat jaetaan matriisimuuttajiin ja syklonikonverttereihin. Matriisimuuttujassa on yhdeksän kytkintä, joilla jokainen lähtövaihe voidaan kytkeä jokaiseen tulovaiheeseen. Matriisimuuttujan lähtöjännitteeseen valitaan kytkimillä paloja eri syöttävän verkon vaihejännitteistä siten, että sekä lähtöjännitteen keskiarvo että syöttöverkon vaihevirran keskiarvo muuttuvat sinimuotoisesti. Syöttöverkosta tulevaa tehokerrointa on lisäksi mahdollista ohjata halutuksi kuorman tehokertoimesta riippumatta. Käytännössä matriisimuuttujan hyödyntäminen on jäänyt vähäiseksi. Matriisimuuttujan toiminta on mahdollista vain, jos toinen kolmivaiheverkosta on jännite- ja toinen virtalähde. Sähkökoneet omaavat luonnostaan induktanssia, joka tekee niistä virtalähteen kaltaisia.

Puolijohdetehokytkimet muodostavat matriisimuuttajan toiminnalle ongelman. Kytkimellä tulee olla sekä johtokykyä että estokykyä molempiin suuntiin. Tällaisia puolijohdekytkimiä ei ole olemassa, joten kytkimet valmistetaan kahdesta transistorista ja kahdesta diodista. Alla olevassa kuvassa 5 olevat yhdeksän kytkintä ovat käytännössä 36 puolijohdetehokytkintä.



Kuva 5. Matriisimuuttujan kytkinmalli. [6, s. 51]

Syklokonvertteri on ainoa kaupallisesti hyödynnetty suora taajuusmuuttaja. Se muodostetaan 18 vastarinnankytketystä tyristorisillasta. Tyristoreita syötetään muuntajan kolmivaiheisesta toisiosta. Syklokonvertteri on myös matriisimuuttaja. Tyristorisilloja käytettäessä vaihtosähkön tuottamiseen edellyttää kuitenkin ohjauskulman ja sillan vaihtoa kaksi kertaa lähtöjännitteen jakson aikana kussakin moottorin vaiheessa. Läh-
tötaajuuden suurentuessa jännitteen aaltomuoto poikkeaa yhä enemmän sinimuodosta. Tämä tarkoittaa sitä, että käyttökelpoinen maksimilähtötaajuus on vain puolet syöt-
tävän verkon taajuudesta eli noin 24 Hz. Sähköverkon taajuus on 50 Hz. Alla olevassa kuvassa 6 on esiteltyä syklokonvertteri. [6, s. 48 - 52]

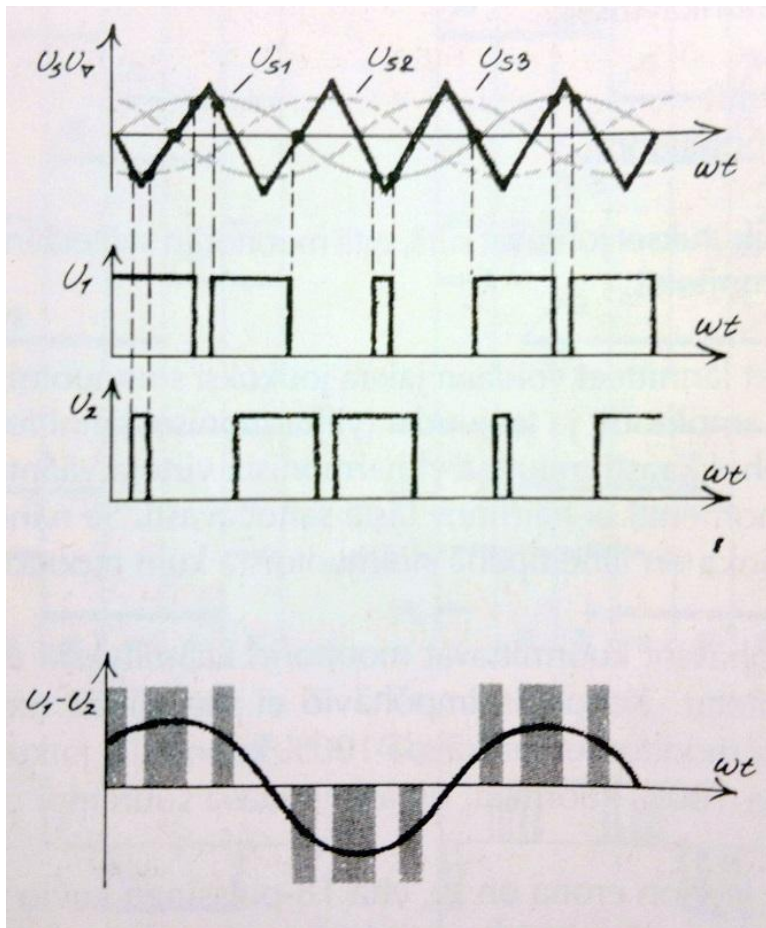


Kuva 6. Syklokonvertterin kytkentä. [5, s. 52]

Pulssinleveysmodulaatiossa (PWM) ohjaus perustuu sinimuotoiseen vertailujännitteeseen taajuusmuuttajan kaikissa ulostuloissa. Vertailujännitteet ovat aluksi kolmijännitettä. Puolijohteet ovat päällä tai pois päältä, kun kolmijännite ja vertailujännite leikkaavat toisensa.

Kolmiojännitteen ollessa sinijännitettä suurempi, lähtöpulssi on negatiivinen ja kolmiojännitteen ollessa sinijännitettä pienempi, lähtöpulssi on positiivinen. Taajuusmuuttajan välipiirin jännite määrää suurimman lähtöjännitteen. Lähtötaajuus määräytyy taajuusmuuttajan lähtönavoissa olevien positiivisten ja negatiivisten puolijaksojen perusteella. Molempien jännitepulssien amplitudit ovat 50 % välipiirin jännitteestä.

Taajuuden pientyessä jakson aika pitenee. Jos se pitenee liian paljon, kolmiojännitteen taajuus muuttuu. Tästä on seurauksena jännitteettömiä jaksoja ja häiriöitä käytävään sovellukseen. Tämän välttämiseksi täytyy kolmiojännite kaksinkertaistaa pienillä taajuuksilla. Sinimuotoisella vertailumoduloinnilla toimiva taajuusmuuttaja pystyy käyttämään suurimmillaan 87 % nimellisjännitteestä. [1, s. 25 - 26]

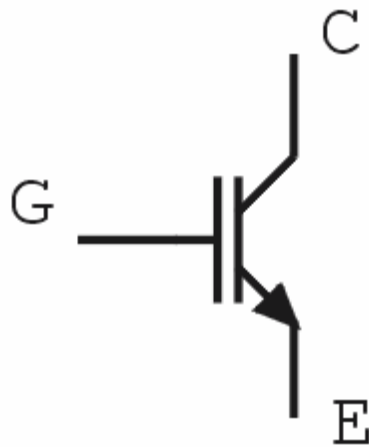


Kuva 7. Siniohjatun pulssinleveysmoduloinnin periaate. [1, s. 26]

2.2 IGBT

Tehoelektronikassa yleisimmin käytettyjä transistoreita ovat kanava- ja IGBT-transistorit. Eristetyllä hilalla varustetut bipolaaritransistorit (Insulated Gate Bipolar Transistor) esiteltiin 1980-luvulla. IGBT-transistorit kestävät suuria jännitteitä ja virtoja.

IGBT on rakenteeltaan samanlainen kuin MOSFET, mutta IGBT-transistorin p-tyyppin puolijohdealue on lisätty drain-alueen jatkoksi. IGBT-transistorin jännitehäviöt pysyvät pieninä p-tyyppin alueen vaikutuksen ansiosta. Sisäistä diodia ei tarvita, mutta siltakytkennoissä diodi on välttämätön.



Kuva 8. IGBT-transistorin piirrosmerkki, jossa on kolme terminaalaa. [14, s. 99]

IGBT-transistori voidaan valmistaa kahdella eri tavalla. PT- rakenne (Punch Trough) muodostuu epitaksiaalisesti kasvattamalla. Prosessi on samanlainen kuin MOSFET-transistoreilla. Tämä on kuitenkin kallis ja hidas tapa, joten tästä johtuen n-alueen paksuus pyritään pitämään ohuena. Vastaavasti kollektoripuolella käytetään voimakkaammin seostettua n-puskurikerrosta.

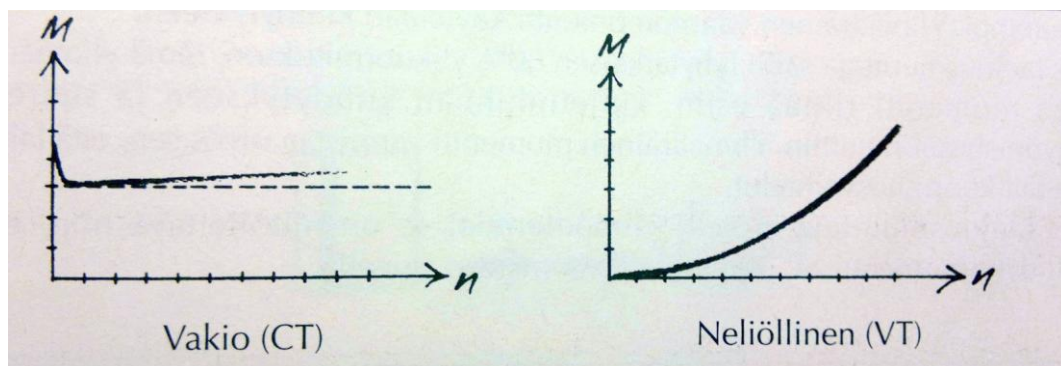
Toisessa valmistustavassa ei tarvita puskurikerrosta, jolloin materiaalia ei tarvitse säätellä. NPT-rakenteessa (Non Punch Trough) oikosulkuvirta rajoittuu hilajännitteen määräämään arvoon eikä parasiittisen tyristorin aktivoitumisvaaraa ole. Muita etuja ovat jännitehäviöiden positiivinen lämpötilariippuvuus, jälkivirran suuruuden riippumatto-

muus lämpötilasta ja pienet kytkentähäviöt. Ainoa negatiivinen asia verrattuna PT- rakenteeseen on isompi jännitehäviö johtavassa tilassa. [15, s. 101]

2.3 Taajuusmuuttajan mitoitus

Taajuusmuuttajakäyttöä mitoitettaessa on ensimmäiseksi selvitettävä kuormitus. Jos sovelluksessa ei ole ylikuormitusta vaativia tilanteita, voidaan taajuusmuuttaja valita jännitteen ja tehon perusteella. Tiettyjä taajuusmuuttajia voidaan hetkellisesti ylikuormittaa ja tätä mahdollisuutta voidaan hyödyntää käynnistyksen tai pysäytyksen yhteydessä. Tällä tavalla luodaan suurempi irrotusmomentti. [4, s. 38 - 39]

Taajuusmuuttajan koon määrittelyssä voidaan erotella kaksi erilaista kuormitusluokkaa, vakiona pysyvä ja neliöllinen kuormitusmomentti. Pumpun tai puhaltimen tehontarve kasvaa nopeuden kolmannessa potenssissa, kun käyntinopeus suurenee. Pumpun tai puhaltimen käyntinopeus ei saa ylittää synkronista nopeutta. Normaali toiminta-alue pumpuille on 30-80% suurimmasta kuormasta.



Kuva 9. Vakiona pysyvä ja neliöllinen kuormitusmomentti [1, s. 63]

Jos kuormitusmomentti on vakio, moottorin vääntömomentin on oltava sitä suurempi. Taajuusmuuttajilla, joilla sallitaan hetkellinen ylikuormitus, voidaan ylimääräinen momentti suureen käynnistysmomenttiin. Taajuusmuuttajilla, joilla ei sallita ylikuormitusta, kiihdytysmomentin on oltava nimellismomentin alueella. [1, s. 64]

Kokonaishyötysuhdetta laskettaessa on huomioitava moottorin ja säädön häviöt. Syntyvät häviöt ovat tässä tapauksessa lämpöhäviöitä. Sähköverkosta tuleva syöttöteho P koostuu jännitteestä, virrasta ja tehokertoimesta. Sähkömoottorille verkosta tuleva teho on sähköisessä muodossa ja lähtöteho mekaanisessa muodossa. Sähköteho jaetaan pätötehoksi ja loistehoksi. Näiden tehojen suuruuden saa selville tehokertoimella. Sähkökäytön kokonaishyöty suhde on aina yli 0,8, kun käytössä on taajuusmuuttaja. Pelkän taajuusmuuttajan hyötysuhde on välillä 0,97- 0,99. [5, s. 14]

Seuraavassa esimerkissä valitaan taajuusmuuttaja moottorin ottaman tehon S_m ja taajuusmuuttajan antaman tehon perusteella. Esimerkissä on 7,5 kW:n moottori 3 x 380 V ottaa 15,5 A. Laskennan perusteella valitaan taajuusmuuttaja, jonka suurin jatkuva antoteho on suurempi tai yhtä suuri kuin 10,2 kVA vakio- tai neliöllisellä momentilla. [1, s. 65]

$$S_M = \frac{U \times I \times \sqrt{3}}{1000} = \frac{380 \times 15,5 \times \sqrt{3}}{1000} = 10,2 \text{ kVA}$$

Kuva 10. Moottorin ottama teho näennäistehon kaavalla laskettuna. [1, s. 65]

Alla olevassa taulukosta voidaan nähdä Parker AC30-taajuusmuuttajan ulostulevat virrat.

Taulukko 1. Parker AC30-taajuusmuuttajan suoritearvot. [3, s. 16]

Parker AC30	Kuormitettavuus					
	Normaali käyttö			Raskas käyttö		
	Ulostuleva virta Arms			Ulostuleva virta Arms		
	Teho (kW)	400 VAC	480 VAC	Teho(kW)	400 VAC	480 VAC
31V-4D0004-B	1,1/1,5	3,5	3	0,75/1	2,5	2,1
31V-4D0005-B	1,5/2	4,5	3,4	1,1/1,5	3,5	3
31V-4D0006-B	2,2/3	5,5	4,8	1,5/2	4,5	3,4
31V-4D0008-B	3/4	7,5	5,8	2,2/3	5,5	4,8
31V-4D0010-B	4/5	10	7,6	3/4	7,5	5,8
31V-4D0012-B	5,5/7,5	12	11	4/5	10	7,6
31V-4E0016-B	7,5/10	16	14	5,5/7,5	12	11
31V-4E0023-B	11/15	23	21	7,5/10	16	14
31V-4F0032-B	15/20	32	27	11/15	23	21
31V-4F0038-B	18/25	38	36	15/20	32	27
31V-4G0045-B	22/30	45	40	18/25	38	36
31V-4G0060-B	30/40	60	52	22/30	45	40
31V-4G0073-B	37/50	73	65	30/40	60	52
31V-4H0087-B	45/60	87	77	37/50	73	65
31V-4H0105-B	55/75	105	96	45/60	87	77
31V-4H0145-B	75/100	145	124	55/75	105	96

2.4 Taajuusmuuttajan edut ja ongelmat

Taajuusmuuttajilla saavutetaan isoimmat energiansäästöt käytöillä, joiden kuormitusmomentti on neliöllinen. Tämä tarkoittaa, että laitteiston kuormitus lisääntyy pyörimisnopeuden neliössä ja tehon kulutus pyörimisnopeuden kuutiossa. Yleisimmät teollisuuskäytössä olevat sovellukset ovat pumppuja ja puhaltimia.

Taajuusmuuttajalla säädetään taajuutta ja virtaa prosessin kannalta optimaalisella tavalla. Näin toimimalla saadaan pienennettyä moottorin isoa käynnistysvirtahuippua ja sähköverkon turhaa kuormitusta. Pehmeällä käynnistyksellä vähennetään paineiskuja putkistoissa ja myös mekaanisia rasituksia. [8, s. 137 - 138]

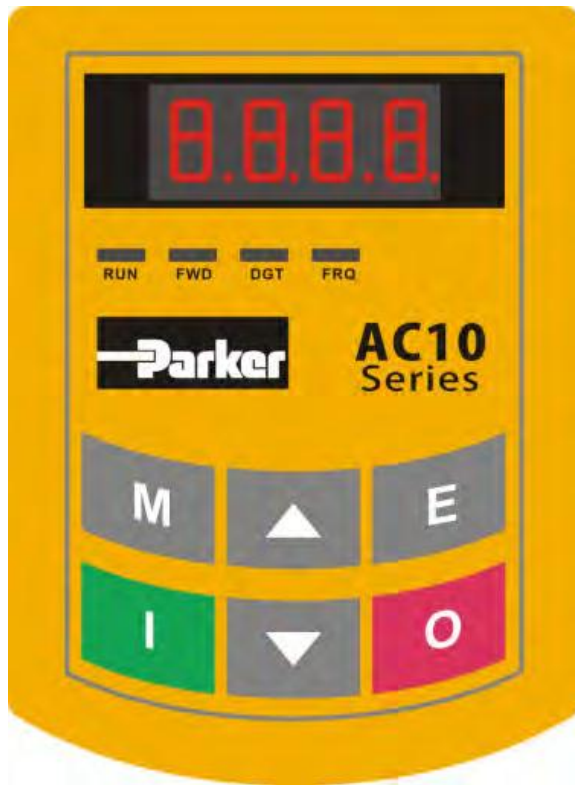
Joissakin sovelluksissa kuorma alkaa pyörittää moottoria. Tällaisessa tilanteessa moottori toimii generaattorina ja energia kulkee moottorilta taajuusmuuttajan suuntaan. Näihin sovelluksiin kuuluu nosto ja laskukäytöt. Energiaa ei pysty siirtämään sähköverkkoon päin ilman vaihtosuuntaajaa, jolloin taajuusmuuttajan välipiirin jännite alkaa nousta ja muodostuu ylijännitelaukaisu. Taajuusmuuttajat sisältävät jarrutransistorin, jota ohjaa välipiirin jännite. Siinä vaiheessa, kun jännite on noussut vaaditulle tasolle ja jarrutransistori alkaa johtaa, siirtyy energia jarruvastuksiin.

Tästä ominaisuudesta on hyötyä nosto- ja laskukäytöissä, joissa moottorin mekaanista jarrua voidaan ohjata taajuusmuuttajan avulla. Taajuusmuuttajassa on taajuustarkkailu, joka voidaan ohjelmoida toimimaan siten, että rajataajuuden ylittyessä tai alittuessa jarru menee päälle tai pois päältä automaattisesti. [1, s. 47]

Taajuusmuuttajiin liittyvät ongelmat ovat sähköisiä häiriöitä. Nämä häiriöt voidaan jakaa kolmeen pääjoukkoon. Komponenteista muodostuvat termiset häiriöt ovat yksi ryhmä. Toiseen ryhmään kuuluvat ilmastosta johtuvat häiriöt. Tähän ryhmään luetaan sähköverkon jännitepiikit salamaniskun jälkeen. Kolmanteen ryhmään luetaan muista sähkölaitteista aiheutuvat häiriöt. [1, s. 169]

2.5 Penkissä käytettävät taajuusmuuttajat

Koeajopenkkiin tulee kaksi Parkerin taajuusmuuttajaa, AC10 ja AC30. Parker AC10 taajuusmuuttaja on helppokäyttöinen, luotettava ja säästöä tuottava taajuusmuuttaja, jota voi käyttää sovelluksissa, joissa tarvitaan nopeuden tai momentin säätöä tehoalueella 0,2kW-22kW.



Kuva 11. Taajuusmuuttajan ohjauspaneeli. [11, s. 18]

Näyttöön saa näkyviin käytössä olevan taajuuden, tavoitetaajuuden, käytössä olevan ohjelman koodin, parametrin arvot tai vikakoodin. Näytön alapuolella olevat ledit näyttävät työskentelytilan eli onko taajuusmuuttaja käynnissä (RUN), pyöriikö se eteenpäin (FWD) ja taajuuden (FRQ). [11, s. 18]

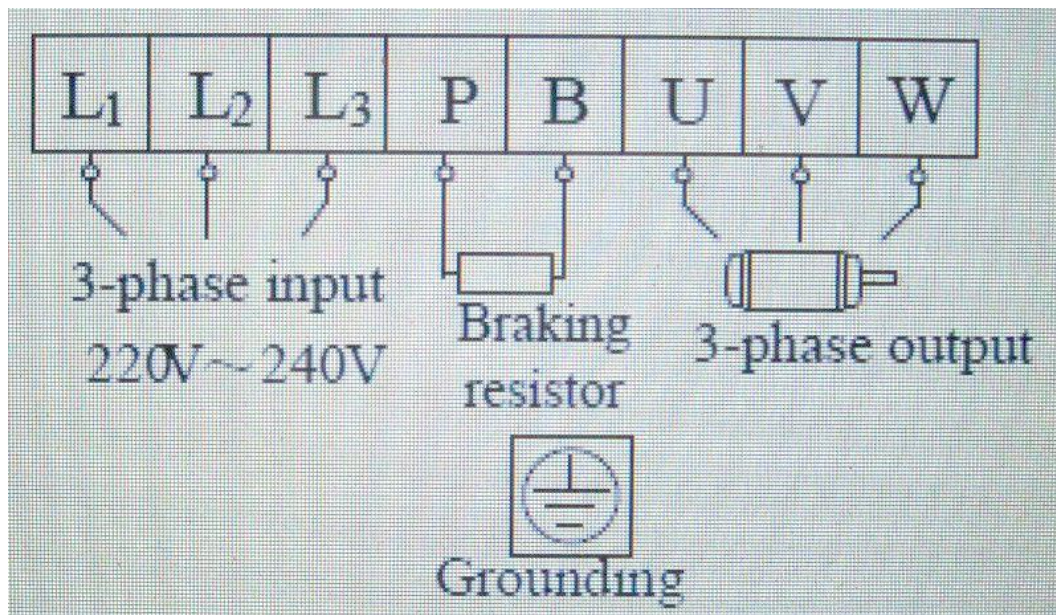
Vihreällä näppäimellä taajuusmuuttajaan saa virrat päälle ja punaisella pois päältä. E-näppäin toimii enterinä eli valinnat hyväksytään tällä näppäimellä. Nuolinäppäimillä liikutaan valikoissa eteenpäin tai takaisin.

AC10 sopii käytettäväksi kolmivaiheverkossa 380-480V alueella ja yksivaiheverkossa 220-240V alueella. Ulostulevan jännitteen taajuusalue on 0,5-650 Hz.

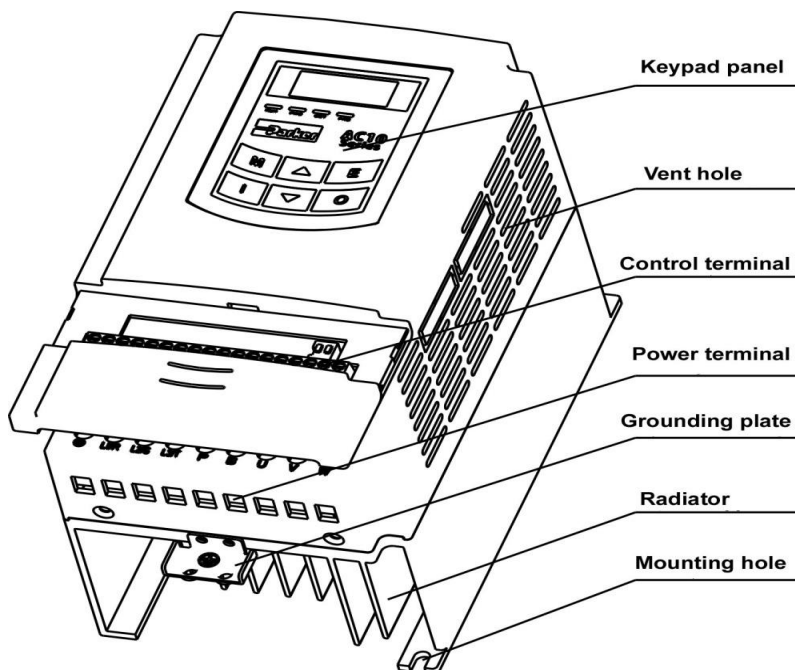
2.6 Peruskytkennät ja käyttöönotto

Parker AC10 taajuusmuuttaja tulee ottaa käyttöön pystyasennossa ja sen ympärille täytyy jättää riittävästi tilaa, jotta tuuletus onnistuu. Taajuusmuuttajan liitännät R/L1,

S/L2 ja T/L3 kytetään syöttävään verkkoon. Maajohto kytketään maahan ja U, V ja W moottorille. Moottori on syytä myös maadoittaa.



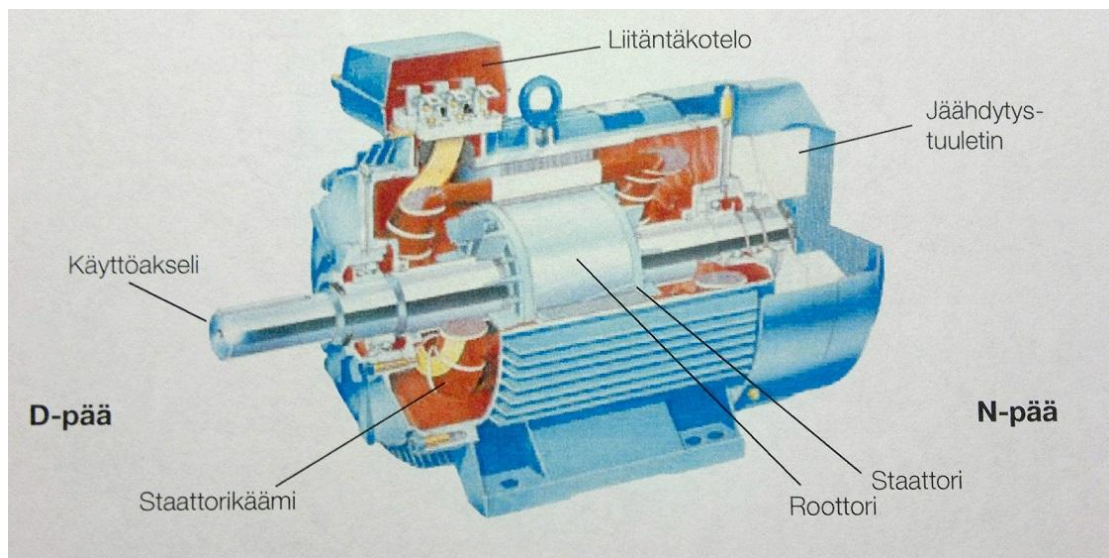
Kuva 12. Esimerkki taajuusmuuttajan kytkennöistä kolmivaiheverkkoon. [11, s. 24]



Kuva 13. Parker AC10-taajuusmuuttaja. [11, s. 12]

3 Sähkömoottorit

Sähkömoottori muuttaa sähköenergian mekaaniseksi energiaksi, jolla aikaansaadaan erilaisten laitteiden tarvitsema käyttövoima. Oikosulkumoottori on yleisin moottorityyppi. Oikosulkumoottoreita valmistetaan 1- ja 3-vaihekäyttöön. Oikosulkumoottoriin kuuluu kaksi perusosaa, staattori ja pyörivä roottori. Staattori muodostuu metallirungosta, staattorisydäimestä ja käämityksestä. Oikosulkumoottorin kiinteään rakenteeseen kuuluvat myös sähköiset liitännät, kytkentäkotelot laakerikilvet ja jäähdytyspuhaltimen suoja.



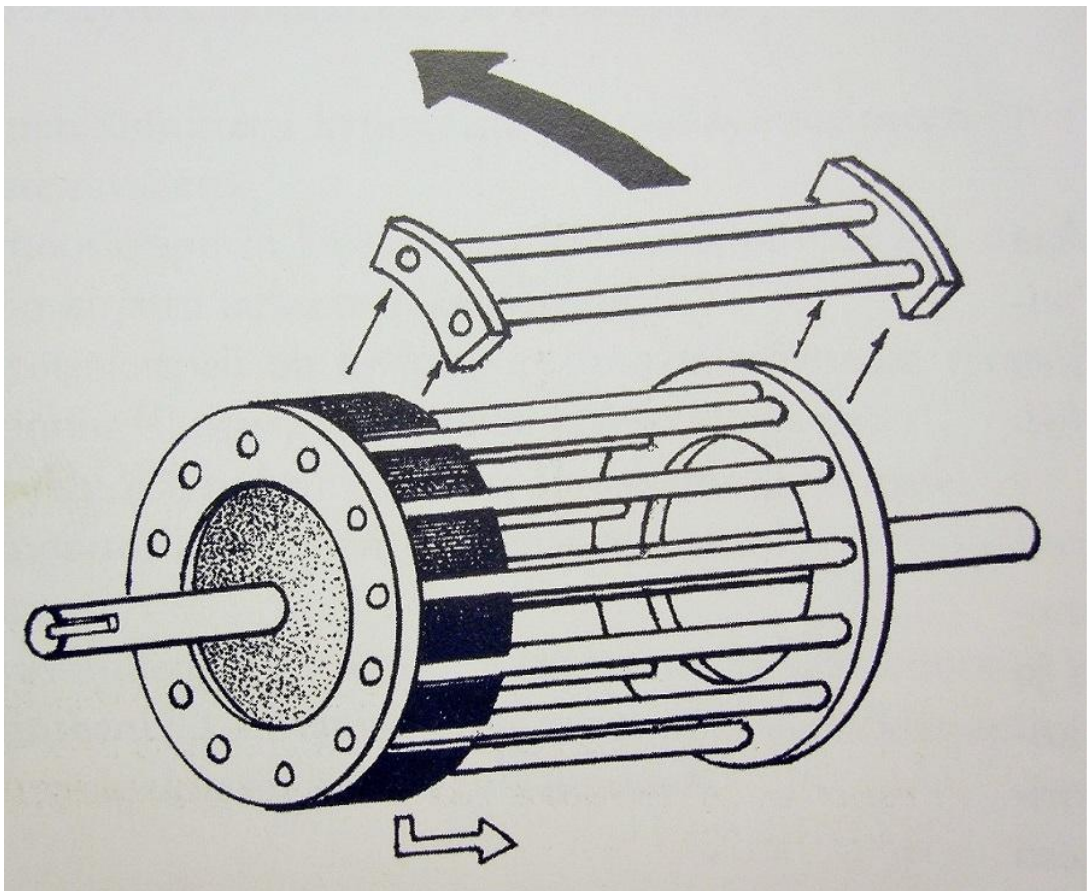
Kuva 14. Oikosulkumoottori. [9, s. 4]

Pienten oikosulkumoottorien rungot tehdään alumiiniseoksesta, teollisuus ja ex-moottorien valuraudasta ja suuremmat hitsataan teräksestä.

Staattorilevyt, joissa on käämitysurat, kootaan päällekkäin paketiksi ja asennetaan rungon sisälle. Käämitysuriiin laitetaan valmiit käämivyyhdit, joita on kaksinapaisessa moottorissa kaksi vaihetta kohti. Käämien päät liitetään kytkentäkotelon liittimiin määrättyssä järjestyksessä.

Roottorin eli pyöräjän akseli pyörittää käytettävää konetta. Akselille on asennettu myös moottorin jäähdytyspuhallin. Roottoriin on kiinnitetty akselin suuntaiset käämisauvat, joissa käytetty materiaali on alumiinia tai kuparia. Oikosulkumoottorin nimitys tulee siitä, että käämitykset on oikosuljettu molemmista päistä toisiinsa. Roottorin käämitys muodostaa avoimen lieriömäisen häkin, josta sen yhteydessä käytetty termi häkkikäämitys on peräisin.

Kuormituksen rasittaessa moottoria normaalia enemmän koneen akselia säteen suuntaisesti, käytetään yleensä yksirivisiä urakuulalaakereita. Viistokuulalaakerit kestävät roottorin pituusakselin suuntaista, aksiaalikuormitusta. [8, s.149 - 150]



Kuva 15. Periaatekuva roottorin häkkikäämityksestä. [8, s. 150]

3.1 Oikosulkumoottorien käynnistystavat

Oikosulkumoottori voidaan käynnistää neljällä eri tavalla. Yleisin käynnistystapa on suora käynnistys, direct on line (DOL). Käynnistyslaitteistossa on vain pääkontaktori ja lämpörele tai elektroninen ylikuormitusrele. Suorassa käynnistyksessä haittapuolena on maksimaalinen käynnistysvirta, joka on 6-8 kertaa moottorin nimellisvirta. Moottori on jännitteetön käynnistuksen aloitushetkellä, jolloin käynnistuksen magnetointihuippu voi olla yli 20-kertainen nimellisvirtaan nähden. Suorassa käynnistyksessä käynnistysmomentti on yleensä liian suuri sovelluksen kannalta. Tästä voi aiheutua turhaa rasi- tusta käytettävälle laitteelle. Suorassa käynnistyksessä moottorin ainoa pysäytystapa on suora pysäytys.

Tähtikolmiokäynnistin muodostaa yleensä kolmesta kontaktorista, ylikuormitusreleestä ja ajastimesta. Tähtikolmiokäynnistyksessä moottorin on oltava jatkuvan käytön aikana kolmiokytkennässä. Tässä käynnistystavassa kiihdytyksen ensimmäisen vaiheen aikana moottorin käämitykset tähtikytkennässä ottavat pienempää virtaa. Tietyn ajan jäl- keen kytkentä muodostuu kolmiokytkennäksi, josta moottori saa täyden virran ja täyden momentin. Jokaisen moottorikäämityksen läpi kulkeva jännite on sama kuin verkon jännite. Kahden rinnakkaisen käämityksen välille jaetaan moottorin virta kertoimella $1/\sqrt{3}$ verkkovirtaan verrattuna. Moottorikäämitysten impedanssin ollessa Z , on rinnak- kaisten käämitysten impedanssi $Z/\sqrt{3}$.

Tähtikytkennässä moottorin käämitykset kytketään sarjaan. Impedanssi on tässä tilan- teessa $\sqrt{3} \cdot Z$ ja tästä saadaan impedanssi $((\sqrt{3} \cdot Z)/(Z/\sqrt{3}) = 3)$. Tämä on 3-kertaisesti kolmiokytkennän impedanssi. Jännitetaso pysyessä samana, tähtikytkennän virta on $1/3$ kolmiokytkennän virrasta. Tästä johtuen tähtikolmiokäynnistyksessä tähtikytkennän virta $1/3$ kolmiokytkentään nähden.

Moottori tuntee tähtikäynnistuksen jännitteen pienentymisenä, koska jännite jokaisessa moottorin käämityksessä on $1/\sqrt{3}$ pääjännitteestä. Jännitteen pienentyminen pienentää myös momenttia. Kolmiokytkennän todellinen momentti on 25 % hävikkien ja muiden hyötysuhdetekijöiden takia. Tämän takia tähtikolmiokäynnistys ei sovi raskaiden sovel- lusten käynnistämiseen. Moottori ei ehdi kiihtyä nimellismooteuteen, ennen kuin kuormi- tusmomentti on yhtä suuri kuin moottorin momentti. Nimellismooteus saavutetaan kol- miokytkennällä, josta aiheutuu usein isoja voimansiirto- ja virtahuippuja. Tähtikol- miokäynnistuksen pysäytys tapahtuu suoralla pysäytyksellä. [9, s. 14 - 15]

Taajuusmuuttaja nostaa taajuuden nolasta hertsistä verkon taajuuteen asteittain, jolloin moottori toimii nimellisa nopeudella koko taajuusalueella. Moottorin käydessä nimellisa nopeudella, on nimellismomentti käytössä heti käynnistuksen alkuhetkellä. Virta on nimellisa virran suuruinen ja sen ylittyessä 1,5-kertaisesti, taajuusmuuttaja laukeaa viikaan. Pehmokäynnistimeen verrattuna taajuusmuuttaja on kallis, jos sovelluksessa ei tarvitse säädellä moottorin nopeutta jatkuvasti. Taajuusmuuttaja on fyysisesti isompi ja painaa enemmän, joten sen käyttäminen ei sovellu paikkoihin, joissa paino on merkittävässä osassa. [9, s. 16 - 17]

Pehmokäynnistin rampittaa moottorille syötetyn jännitteen lähtöjännitteestä täydeksi jännitteeksi. Tällä vältetään turhat nytkähdykset käynnistuksessa. Jännite ja momentti suurenee koneiston kiihtyessä. Pehmokäynnistuksen etuna on momentin säätömahdollisuus halutunlaiseksi eikä moottorin kuormalla ole merkitystä. Pehmokäynnistin tarvitsee vähemmän aloitusvirtaa, joka poistaa verkon jännitteen alenemat. Pienempi käynnistysmomentti vähentää mekaanisia rasituksia, jolloin huollon tarve vähenee. [9, s. 18]

3.2 Penkissä käytettävä sähkömoottori

Koeajopenkissä tullaan käyttämään Parkerin valmistamaa 1,5 kW:n sähkömoottoria. Moottorin runko on valmistettu alumiinista ja ne on suunniteltu kovaan käyttöön erilaisiin teollisiin sovelluksiin. Suojausluokkana on vähintään IP55 ja eristysluokkana F. Moottoreita valmistetaan 0,09-315 kW:n tehoalueelle. Moottorin pyörimisa nopeus on 0-3000 kierrosta minuutissa. Moottoreita on saatavana 2,4 tai 6 -napaisena. Alla olevassa kuvassa oleva MR -sarjan moottori kuuluu IE2 tehokkuusluokkaan, johon keskitytään tarkemmin seuraavassa kappaleessa.



Kuva 16. Parkerin MR -sarjan sähkömoottori. [12, s.16]

3.3 Sähkömoottoreiden kiristyvät tehokkuusluokat

Heinäkuussa 2009 kansainvälinen elektrotekninen komissio IEC päätti muuttaa kolmi-vaihemoottorien tehokkuusluokkia. Monissa maissa on ollut oma luokitus käytössä. Vanha luokitus jakaa moottorit kolmeen luokkaan, EFF3, EFF2 ja EFF1. Uusi luokitus (IEC60034-30) jakaa moottorit tehokkuuden mukaan myös kolmeen luokkaan. Uudet tehokkuusluokat ovat IE3, IE2 ja IE1. Tämä luokitus koskee moottoreita, joiden teho on välillä 0,75kW – 375 kW.

Kesäkuusta 2011 eteenpäin myydyt moottorit ovat tarvinneet vähintään IE2 luokituksen. Tammikuusta 2015 eteenpäin teholtaan 7,5-375kW moottoreiden täytyy täyttää IE3 luokan vaatimukset tai vaihtoehtoisesti IE2 luokan vaatimukset, jos se on varustettu elektronisella nopeudensäätäjällä. Tammikuusta 2017 eteenpäin teholtaan 0,75-

375kW moottoreiden täytyy täyttää IE3 luokan vaatimukset tai vaihtoehtoisesti IE2 luokan vaatimukset, jos se varustettu elektronisella nopeudensäätäjällä. Tässä tapauksessa elektronisella nopeudensäätäjällä tarkoitetaan taajuusmuuttajaa. [10, s. 5]

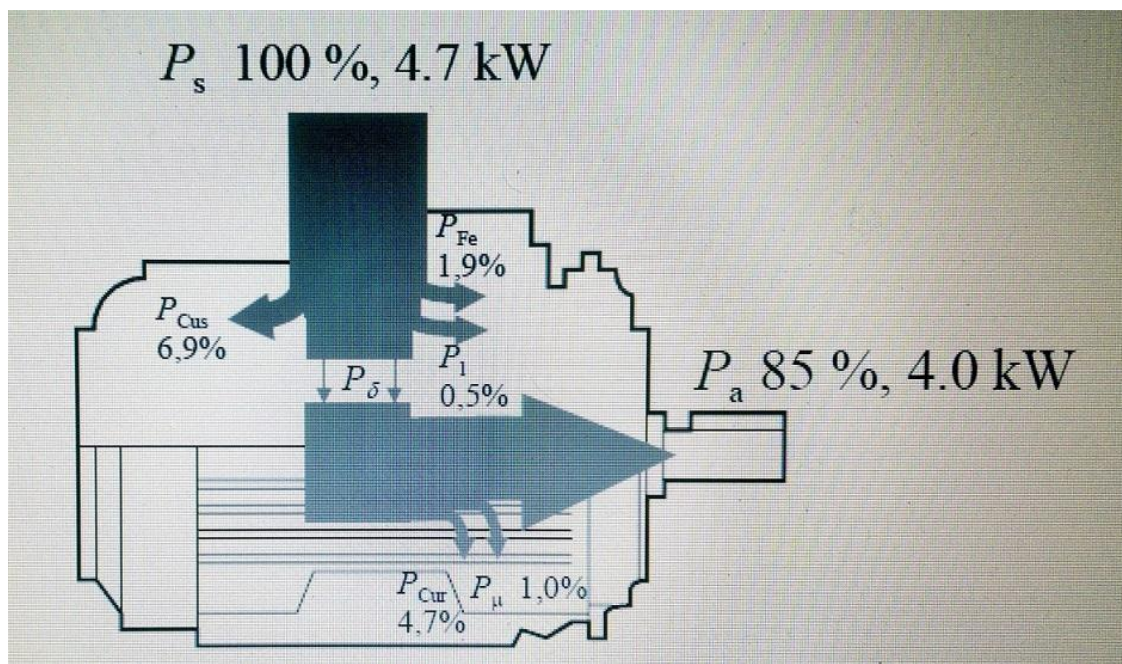


Kuva 17. Kolmivaihemoottorien tehokkuusluokkien aikataulu. [10, s. 5]

3.5 Sähkömoottorin jäähdytys

Koneen lämpenemä määrittää koneen tehon, joten sähkökoneen lämmönsiirron suunnittelu on yhtä tärkeää kuin sähkömagneettinen suunnittelu. Sähkökoneen lämmön - ja aineensiirto on monimutkaisempi ja vaikeampi hallita, jos verrataan koneen muuhun suunnitteluun.

Lämpö voi siirtyä kolmella eri tavalla; konvektiolla, johtumalla ja säteilemällä. Useimmissa moottoreissa riittävä jäähdytys saadaan käyttämällä kaikkia näitä menetelmiä. Lämmön jakautuminen koneen eri osiin täytyy myös ottaa huomioon. Tähän liittyy myös erilaisia yksityiskohtia lämmön siirtymisestä kuparijohtimesta eristyksen yli staattorirunkomateriaaliin. Lämmön jakautuminen koneen eri osiin pystytään laskemaan, kun koneen eri häviöt ja lämmön poistoteho tunnetaan. Sähkömoottorin eri häviöitä ovat rautahäviöt, staattorin kuparihäviöt, roottorin kuparihäviöt ja kitkahäviöt. Alla olevassa kuvassa 4 kW:n kaksinapaisessa oikosulkumoottorissa häviöitä on yhteensä 700W. Kuvan sähkömoottorin lämpenemä on mitoitettu B-luokan mukaan ja eristys on F-luokan mukainen. [13, s. 1 - 2]



Kuva 18. Oikosulkumoottorin Sankey-diagrammi, jossa eri häviöt ovat näkyvissä. [13, s.2]

Sähköisen eristyksen kestoään voidaan olettaa olevan verrannollinen koneen lämpötilanousuun ΔT siten, että jatkuva 10 asteen lämpötilanousu lyhentää sähkömoottorin eristyksen kestoikää jopa puoleen verrattuna koneeseen, jossa ei ole jatkuvaa lämpötilanousua. Lämpötilanpiikin kestolla ja korkeudella on merkitystä siihen kuinka paljon sähkökone kestää lämpötilan nousua. [13, s. 1-2]

Käämityksen resistanssi kasvaa käämityksen lämpötilan noustessa. 50 asteen lämpötilanousu kasvattaa resistanssia 20 % ja 135 asteen nousu 50 %. Käämityksen resistanssin mittauksella voidaan määritellä sähkökoneen käämityksen lämpötila, mutta tämä ratkaisu kertoo ainoastaan lämpötilan keskiarvon. Kuumimmat pisteet voivat olla 10 - 20 astetta keskiarvoa korkeammat.

Taulukko 2. Eristeaineiden lämpötilaluokat. [12, s. 2]

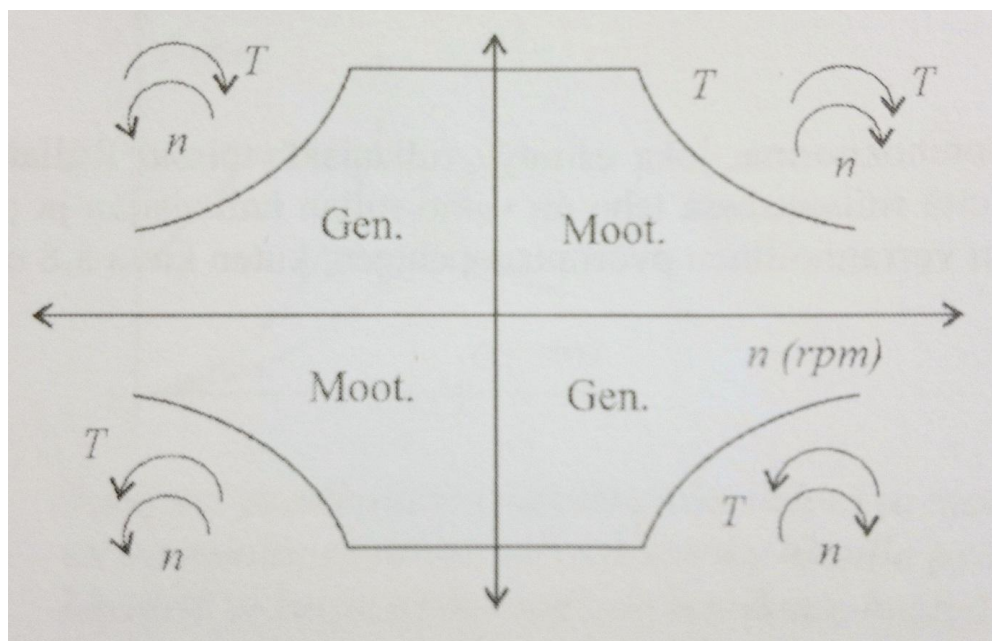
Luokka	Kuumimman pisteen rajalämpötila [°C]	Sallittu lämpenemä [°C], kun ympäristön lämpötilan on 40 °C	Sallittu vastusmittauksella määritetty lämpenemä [°C]
Y	90		
A	105	60	
E	120	75	
B	130	80	120
F	155	100	140
H	180	125	165
C	>180		

Taulukossa 2 on esitetty IEC34-1 -normin mukaiset lämpötilat ja lämpötilaluokat. Kuumimman pisteen rajalämpötila kertoo suurimman sallitun lämpötilan, jonka eristyksen kuumin osa saa korkeimmillaan saavuttaa. Lämpenemä ilmoittaa käämitykselle suurimman sallitun lämpötilannousun nimelliskuormituksella. [13, s. 2]

3.4 Nelikvadranttikäyttö

Lähes aina käytöt pyörivät samaan suuntaan ja kuorman jarruttamiselle on vähäinen tarve. Pumppu- ja puhallinkäytöt ovat tästä hyvä esimerkki. Vääntömomenttikäyrällä momentti ja nopeus ovat aina positiivisia. Jarrutuksessa vääntömomentista tulee negatiivista ja pyörimissuunnan vaihtumisessa nopeus hidastuu eli muuttuu myös negatiiviseksi. [5, s. 25]

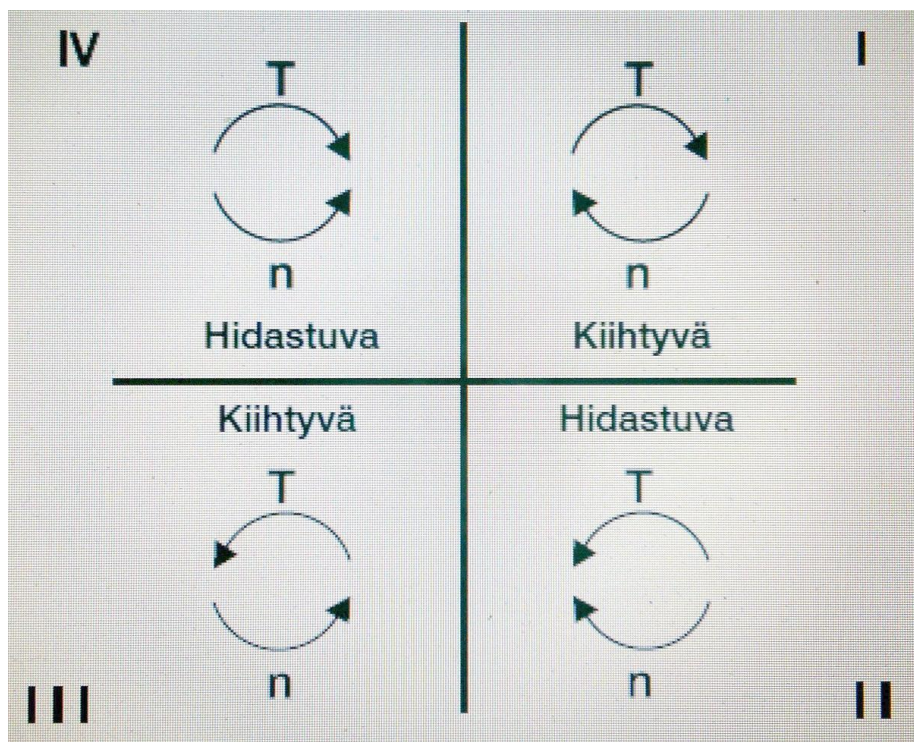
Kohteet, joissa vaaditaan suunnanvaihto-ominaisuutta tai mahdollisuutta toimia pidemmällä ajalla generaattorikäyttöisenä, tulee toimia neljässä kvadrantissa. Tämä ominaisuus on välttämätön, jos energiaa halutaan siirtää takaisin sähköverkkoon. Teolliset prosessit kuten nosturit tarvitsevat näitä ominaisuuksia. Nelikvadranttikäytössä huippumomentti jakautuu jokaiseen kvadranttiin symmetrisesti. [4, s. 42]



Kuva 19. Säädetyn käytön nimellinen momentti pyörimisnopeuden funktiona. [4, s. 42]

Moottorin suunnan vaihto tapahtuu taajuusmuuttajan ramppiajan muodon säätämisellä. Suunnan vaihto jaetaan kahteen osaan, jarrutusosaan ja kiihdytysosaan. Jarrutusosa koostuu jarrutusajasta ja kiihdytysosa kiihdytysajasta.

Jos verkosta häviää jännite, taajuusmuuttaja pystyy toimimaan käyttämällä kuormituksen sitoutunutta liike-energiaa hyväksi, jolloin moottori toimii generaattorina. Sähkömoottorikäyttö pysyy toiminnassa yhtä pitkään kuin moottori, jos se on toiminnassa tuottaa energiaa järjestelmään. Tämä suojaa sähkömoottorikäyttöä hetkellisissä sähkökatkoksissa. [4, s. 43]



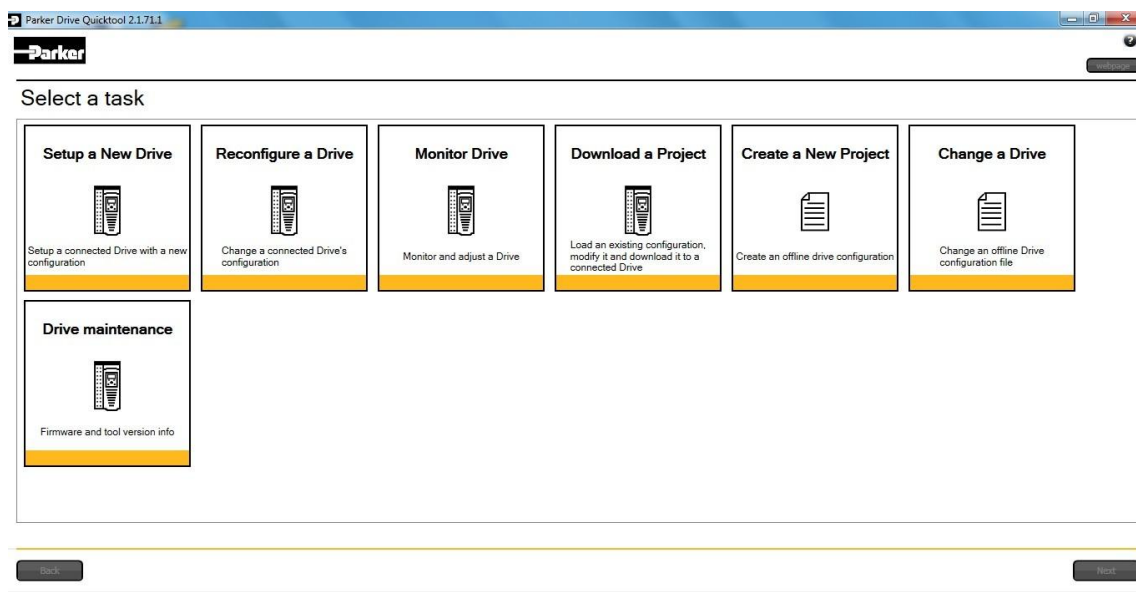
Kuva 20. Nelikvadranttikäyttö.

4 Koeajopenkki

Koeajopenkin päätarkoitus on helpottaa Parkerin taajuusmuuttajien esittelyä asiakkaille. Tätä mahdollisuutta voidaan hyödyntää messuilla ja muissa tilaisuuksissa.

4.1 Penkin toimintaperiaate

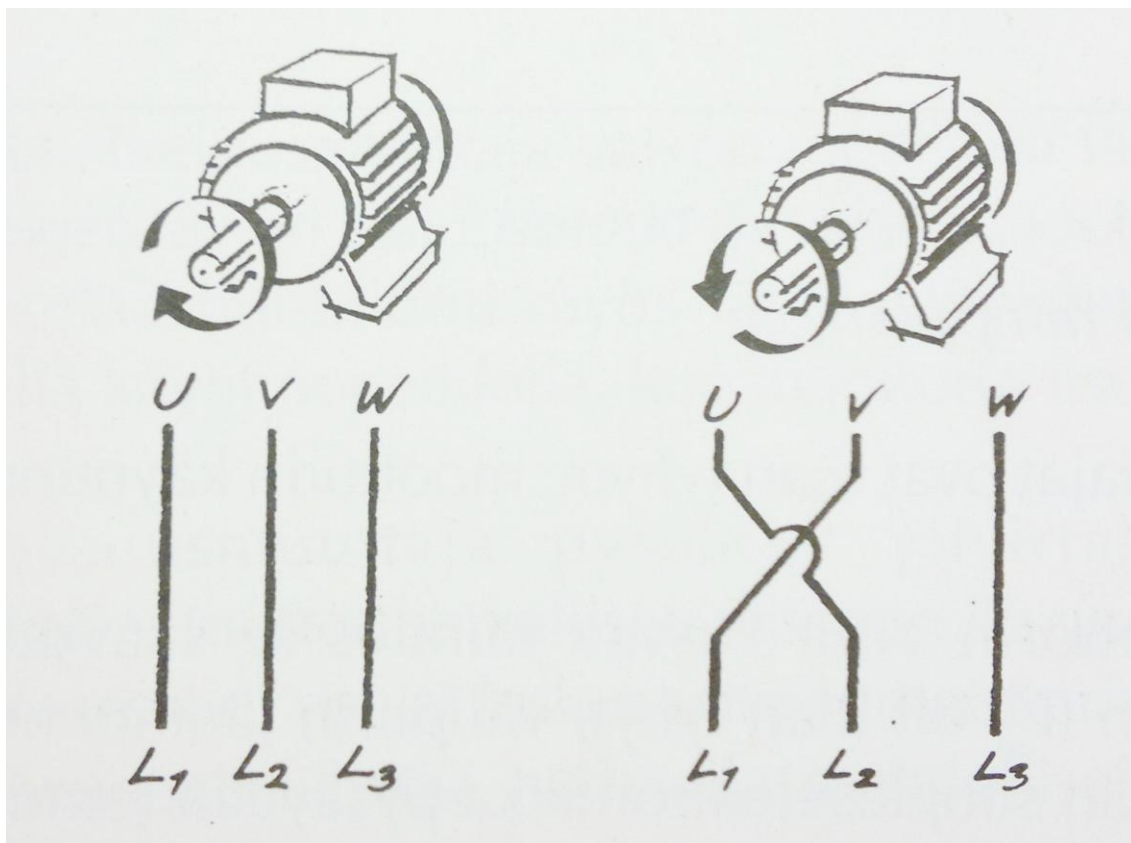
Penkissä on kaksi Parkerin taajuusmuuttajaa, joilla ohjataan sähkömoottoria. Sähkömoottori on 1,5 kW:n 3-vaihe moottori. Taajuusmuuttajat sijoitetaan käyttäjän tasolle ja sähkömoottori keskelle alas, jotta sähkömoottorin paino ei ole liian korkealla. Penkki tulee olemaan mitoiltaan kuormalavan kokoinen, jolloin sen liikuttaminen on mahdollisimman helppoa. Penkin käyttäjällä on käytössä myös tietokone, jolla taajuusmuuttajia voidaan ohjelmoida ja tällä tavoin myös datan säilyttäminen on mahdollista. Ohjelmointiin käytetään Parker Drive Quicktool - ohjelmaa. Myös Parker Drive Developer - ohjelmaa voi käyttää.



Kuva 21. Parker Drive Quicktool - ohjelman päävalikko.

4.2 Sähkömoottorin ohjaus taajuusmuuttajalla

Moottorin pyörimissuunnan pystyy vaihtamaan taajuusmuuttajan avulla elektronisesti. Tämä tapahtuu joko negatiivisella nopeuden asetuksella tai digitaalisella tuloviestillä. Taajuusmuuttajalla tehtävä moottorin suunnanvaihto kestää kauemmin, koska taajuusmuuttaja rajoittaa moottorin virran nimellisarvoonsa. [1, s. 71]



Kuva 22. Vaihejärjestystä muuttamalla moottorin pyörimissuunta vaihtuu. [1, s. 71]

4.3 Penkissä tehtävät harjoitukset

1. Laita virrat päälle pääkatkaisijasta ja taajuusmuuttajasta. Etsi moottorin tiedot tyyppikilvestä ja aseta ne taajuusmuuttajan parametreihin.
2. Koeajopenkissä suoritetaan ensimmäiseksi sähkömoottorin pyörimisnopeuden ja suunnan asetus. Laita pyörimisnopeuden arvoiksi 300 - 1800 kierrosta minuutissa (rpm) ja suunnaksi myötäpäivään pyöriminen.
3. Seuraavaksi asetetaan maksimimomentin säätö kahdessa vaiheessa, ensimmäisessä vaiheessa 80 % ja toisessa vaiheessa 60 %.

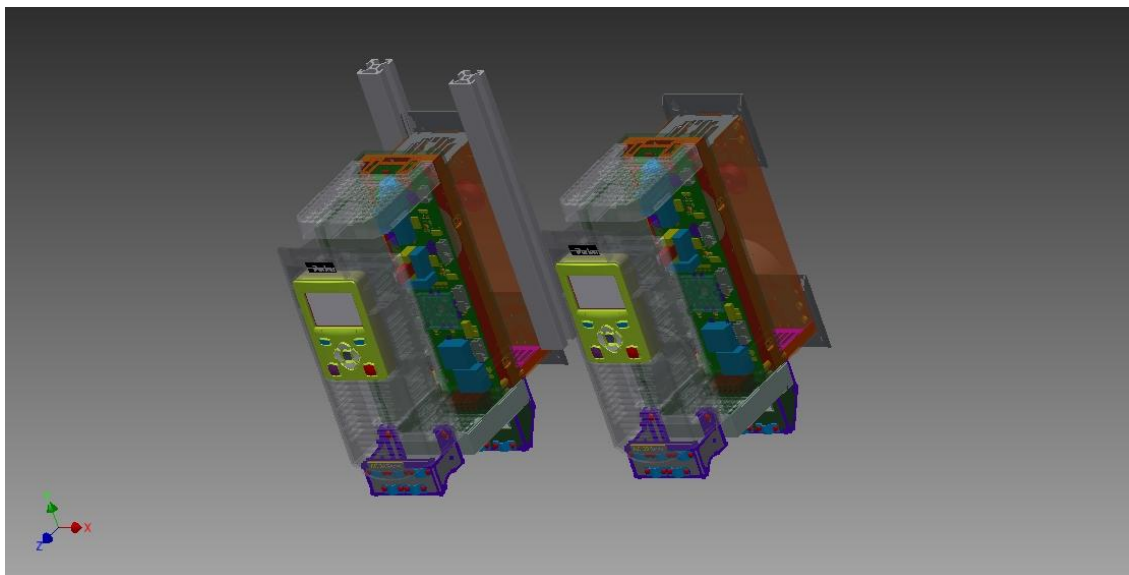
Lähteet

- 1 Erkinheimo, Harri & Käyhkö, Kalevi. 1997. Taajuusmuuttajat. Espoo: Sähköinfo Oy.
- 2 Taajuusmuuttaja. Verkkodokumentti.
<http://fi.wikipedia.org/wiki/Taajuusmuuttaja#mediaviewer/File:PWM_VFD_Diagram.png>. Luettu 19.12.2014.
- 3 Parker AC30 product manual. Verkkodokumentti.
<http://www.parker.com/literature/SSD%20Drives/AC%20Drives/AC30/HA501718U001_EN.pdf>. Luettu 20.12.2014.
- 4 Hietalahti, Lauri. 2012. Säädetty sähkömoottorikäyttö. Vantaa: Tammertekniikka.
- 5 Nopeussäädettyjen käyttöjen opas. Verkkodokumentti.
<[http://www05.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/32f0404329db7689c1256d2800411f0a/\\$file/Tekninen_opas_nro4.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/32f0404329db7689c1256d2800411f0a/$file/Tekninen_opas_nro4.pdf)>. Luettu 15.12.2014.
- 6 Niiranen, Jouko. 1999. Sähkömoottorikäytön digitaalinen ohjaus. Helsinki: Otatie-to Oy.
- 7 Tekninen opas nro 6. Vaihtosähkökäyttöjen yliaalto-opas. Luettu 26.12.2014.
<[http://www05.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/9aaf3178627952c7c1256d2800411f8d/\\$file/tekninen_opas_nro_6.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/9aaf3178627952c7c1256d2800411f8d/$file/tekninen_opas_nro_6.pdf)>
- 8 Mäkinen, Markku & Kallio, Raimo. 2004. Teollisuuden sähköasennukset. Keuruu: Otava.
- 9 Pehmokäynnistinopas. Verkkodokumentti.
<[http://www05.abb.com/global/scot/scot209.nsf/veritydisplay/d11f99611045fef8c125796e00473a8a/\\$file/OPAS%20Pehmokaynnistys%201F112_01.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot209.nsf/veritydisplay/d11f99611045fef8c125796e00473a8a/$file/OPAS%20Pehmokaynnistys%201F112_01.pdf)>. Luettu 15.12.2014.
- 10 Energy efficient induction motors. Verkkodokumentti.
<http://www.cantonigroup.com/gfx/file/cantoni_motor/Catalogs/3SIE_2014.pdf>. Luettu 31.12.2014.
- 11 Parker AC30 product manual. Verkkodokumentti.
<<http://www.parker.com/literature/SSD%20Drives/AC%20Drives/AC10/HA502320U001.pdf>> Luettu 1.1.2015.
- 12 Square Round AC motors. Verkkodokumentti.
<http://www.parker.com/literature/SSD%20Drives/Catalog/192_300202_Square_Round_Frame_AC-Motors.pdf> Luettu 8.1.2015.

- 13 Pyörivän sähkökoneen jäähdytys. Verkkodokumentti.
<https://noppa.lut.fi/noppa/opintojakso/bl20a0100/luennot/luento_7.pdf>. Luettu 10.1.2015.
- 14 Common DC Bus. Verkkodokumentti. <
<http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/sg/drives-sg001_-en-p.pdf>. Luettu 13.1.2015.
- 15 Niiranen, Jouko. 1998. Tehoelektroniikan komponentit. Helsinki: Otatieto Oy.

Suunnittelun 3D-mallinnukset

Tässä liitteenä 3D - mallinnuksessa käytettyjä kuvia.



Kuva 23. Parker AC30 taajuusmuuttaja.



Kuva 24. Sähkömoottori.

